

《环境科学与工程专题》知识点整理

来自 Xzonn 的小站

更新于 2020-01-07 14:59 · 渲染于 2021-01-11 15:29



目录

第 1 讲 大气颗粒物的来源与转化	1	6.3 污染物健康影响评价的基础：暴露与剂量	9
作业	3	6.4 污染物控制的依据：剂效关系	10
第 2 讲 人类世中的大气环境：化学	3	作业	11
作业	4	第 7 讲 从环境到人体：污染物人体健康效应的体	
第 3 讲 流动的大气	5	现	11
第 4 讲 界面电子转移与地表环境	6	7.1 研究背景	11
4.1 研究背景	6	7.2 污染 - 效应研究方法：	11
4.2 电子转移的理论和研究方法	6	7.3 研究例证	13
4.3 界面电子转移与污染物转化	7	作业	13
4.4 界面电子转移与微生物代谢过程	7	第 8 讲 经济发展与能源消费视角下的环境问题及治	
作业	7	理	13
第 5 讲 面向未来的中国污水处理概念厂：核心技术与		8.1 研究背景	13
挑战	7	8.2 能源的基础知识	14
5.1 水污染控制过程中的问题与挑战	7	8.3 能源与经济	14
5.2 中国污水处理概念厂技术理念与发展方向	8	8.4 能源与环境	15
5.3 氮污染物微生物转化相关机制	8	8.5 能源环境政策的费效分析	15
作业	9	作业	15
第 6 讲 从环境到人体：污染物暴露与健康效应 ..	9	2017 年 6 月考试题	15
6.1 环境健康学科简介	9	一、名词解释	15
6.2 人体与环境的关系	9	二、简答题	16

第 1 讲 大气颗粒物的来源与转化

“

郭松 2018 年 2 月 28 日

”

- 雾霾形成过程:

粒子相对湿度与粒子半径的关系受 Kelvin 效应和 Raoult 定律共同影响, 在一定条件下 $S \approx \frac{A}{r} - \frac{B}{r^3}$, 存在

拐点 r_c , $r < r_c$ 时粒径增加过饱和度增加, 为霾; $r > r_c$ 时粒径增加过饱和度减小趋于 0, 为霾。

- Kelvin 效应: 曲面上的蒸汽压力大于平面上的蒸汽压力, 曲面的半径越小, 这个压力越

大。 $A = \frac{2M_w\sigma_s}{RT\rho_w r}$ 。

- Raoult 定律: 在某一温度下, 难挥发非电解质稀溶液的蒸气压等于纯溶剂的饱和蒸气压乘以溶剂的摩尔分

数。 $B = \frac{3M_w m_{\text{solute}} v \Phi}{4\pi r^3 \rho_w M_{\text{solute}}}$ 。

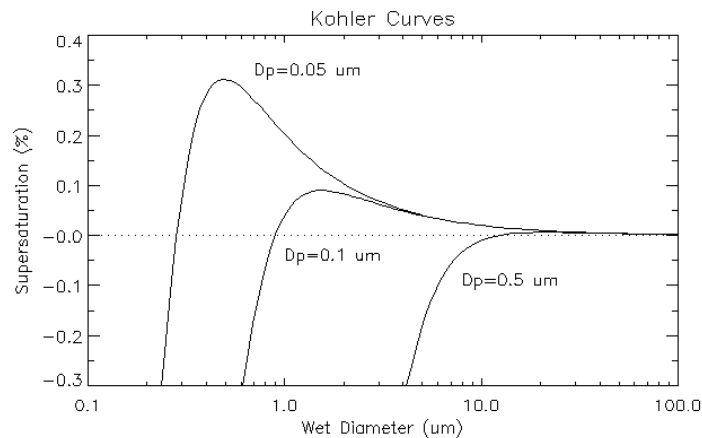


图 1 Köhler 曲线

- 大气气溶胶的概念：气溶胶是指液体或固体微粒均匀地分散在气体中形成的相对稳定的悬浮体系。液体或固体微粒通常称作颗粒物或粒子，是指空气动力学直径从约 3 nm~100 μm 大小的液滴或固态粒子。下限是目前能测出的最小尺度；上限则相应于在空气中不能长时间悬浮而较快降落的尺度。
- PM₁₀ 和 PM_{2.5} 表示空气动力学直径分别小于等于 10 μm 和 2.5 μm 的颗粒物质量浓度。
- 颗粒物形状与等效直径：在度量大气颗粒物大小时，采用简单的等效直径办法。颗粒物粒径用 D_p ， d 或 d_p 表示，单位 μm 或 nm。等效直径是粒子群的统计特征（而不是单个粒子）。根据测量方法和研究目的不同，定义了几种意义完全不同的等效直径。
 - 测量方法：筛分法、显微镜法、光散射法、沉降法。
- 沉降法测定 2 种等效直径：
 - 空气动力学直径 D_p ：即与所研究粒子有相同终端降落速率，密度为 1 g/cm³ 的球体直径。反映出粒子的大小与沉降速率的关系，直接表达出粒子的性质和行为，如粒子在空气中的停留时间，不同大小粒子在呼吸道中沉积的不同部位等。
 - Stokes 直径 D_s ：与研究粒子有相同密度和终端沉降速率的球体直径。与 D_p 换算关系为 $D_p = D_s \sqrt{\rho}$ ， ρ 为颗粒物的密度。
- 流体中沉降的球形颗粒物在重力作用下受力，根据牛顿定律得 $ma = \rho_{\text{颗粒物}} \left(\frac{\pi}{6} \right) D^3 g - \rho_{\text{流体}} \left(\frac{\pi}{6} \right) D^3 g - F_d$ 。左项为作用在颗粒物上的合力，颗粒物向下的加速过程；右三项为作用在颗粒物上的重力、浮力和阻力。空气阻力随着速度的增加而增大，速度为零时阻力也为零。如果颗粒物从静止开始运动，初始速度为零，阻力最初为零。颗粒物迅速加速，在加速过程中，阻力随着速度的增加而增加，直至等于重力与浮力之差。达到终端沉降速度时，作用力之和为零，颗粒物继续以恒定的速度运动。
- Stokes 定律假设：流体是连续的；流动是层流状的；粘度符合牛顿定律；在方程中涉及速度平方项可以忽略。Stokes 定律： $F_d = 3\pi\mu Dv$ ，其中 μ 为流体的黏度。大气颗粒物在空气中因自身的重量而下落，解出终端沉降速度 $v = gD^2 \frac{\rho_p - \rho_0}{18\mu}$ 。
- 大粒径颗粒物不适用于 Stokes 定律。大粒径颗粒物球体周围的流体流动成为湍流，Stokes 定律重要假设不再适用。不能再对流体绕过球体时做忽略包含速度平方项的近似处理。基于这样的忽略方程变得不准确。定义一个新的参数阻力系数 C_d ： $C_d = \frac{F_d}{\frac{\pi}{4} D^2 \rho_{\text{流体}} \frac{v^2}{2}}$ 。

- 雷诺数是流体惯性力与黏性力比值，无量纲的量，流体力学中可用来表征流体流动情况， $Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$ ，其中 v 、 ρ 、 μ 分别为流体的流速、密度与黏性系数， D 为特征长度。例如流体流过圆形管道，则 D 为管道的当量直径。
- Re 可区分流体的流动是层流或湍流， Re 较小时，黏滞力对流场的影响大于惯性力，流场中流速的扰动会因黏滞力而衰减，流体流动稳定，层流； Re 较大时，惯性力对流场的影响大于黏滞力，流体流动较不稳定，流速的微小变化容易发展、增强，形成紊乱、不规则的紊流场，湍流。
- Re 也可用来确定物体在流体中流动所受到的阻力。例如，对于小球在流体中的流动，当 Re 比 “1” 小得多时，其阻力适用 Stokes 公式，当 Re 比 “1” 大得多时， $F_d = \frac{0.2\pi D^2 v^2}{4}$ 而与 μ 无关。
- 沉降速率的估算方法：
 - 层流区： $Re < 0.3$ ， $C_d = \frac{24}{Re}$ ， $v = gD^2 \frac{\rho_p - \rho_0}{18\mu}$ 。
 - 过渡区： $0.3 < Re < 1000$ ， $C_d = \frac{24}{Re}(1 + 0.14Re^{0.7})$ ， $v = \left(\frac{\frac{4}{3}D\rho_{\text{颗粒}}g}{C_d\rho_{\text{流体}}} \right)^{\frac{1}{2}}$ 。
 - 湍流区： $1000 < Re < 2 \times 10^5$ ， $C_d = 0.44$ 。
- 辐射效应：消光、吸光。分子散射以 Rayleigh 散射为主，与波长有关，造成清洁天气的 “蓝天”；颗粒物散射以 Mie 散射为主，与波长无关，造成灰霾现象。

作业

1. 计算直径为 $1\mu\text{m}$ 的球体在空气中的终端沉降速度，已知 $\rho_p = 2000\text{ kg/m}^3$ ， $\mu = 1.8 \times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ ， $\rho_0 = 1.2\text{ kg/m}^3$ 。
2. 利用阻力系数的实验关系式估算粒径为 $200\mu\text{m}$ 颗粒物的真实沉降速度，已知 $\rho_p = 2000\text{ kg/m}^3$ ， $\mu = 1.8 \times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ ， $\rho_0 = 1.2\text{ kg/m}^3$ 。

第 2 讲 人类世中的大气环境：化学

“

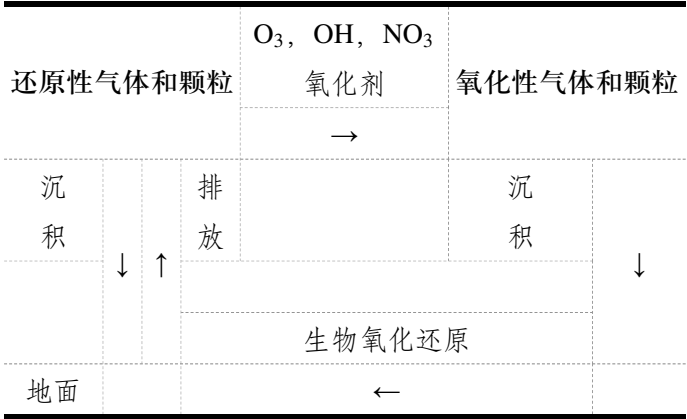
陆克定 2018 年 3 月 14 日

”

- 大气层是地球周围的气体环境，主要集中在离地面 100 km 范围。垂直结构由下到上分为对流层、平流层、中间层、热层。
 - 对流层：最靠近地面，中纬度平均 12 km ，热带 $15\sim 20\text{ km}$ ，包含 82% 的大气质量，温度随高度升高而降低。
 - 平流层：高度 $12\sim 50\text{ km}$ ，包含 18% 的大气质量，温度随高度升高而增加。
- 大气层质量推算： $m_a = \frac{4\pi R^2 p_{\text{surface}}}{g} = 5.13 \times 10^{18}\text{ kg}$ ，物质的量推算： $n_a = \frac{m_a}{M_a} = 1.8 \times 10^{20}\text{ mol}$ ，其中 $R = 6380\text{ km}$ ， $p_{\text{surface}} = 984\text{ hPa}$ ， $M_a = 29\text{ g/mol}$ 。数密度 $= \frac{n_a}{V}$ 。
- 大气层成分： N_2 78% ， O_2 21% ， H_2O $\sim 1\%$ ， Ar $< 1\%$ ， CO_2 $0.038\text{ 0}\%$ ， Ne $0.001\text{ 8}\%$ 。
- 大气层化学性质：1970 年前：温室气体 CH_4 、 N_2O ，有毒气体 CO 、 VOCs ， NO_x ， ODS （消耗臭氧层物质） HCFCs （含氢氯氟烃），粉尘/细颗粒。1970 年后：温室气体 O_3 、 CO_2 ，有毒气体 O_3 、 PANs （过氧酰

基硝酸酯)，灰霾：SOA（二次有机气溶胶），SNA（二次无机颗粒物，硫酸盐、硝酸盐、铵盐）。

- 还原性痕量气体来源：
 - 自然源：光照 ($\text{N}_2 \longrightarrow \text{NO}_x$)，火山 (SO_2 、气溶胶)，海洋，植被（时间空间范围变化大，受季节、时间、pH，营养素影响大）。
 - 人为源：交通，工业，发电，农业。
 - NO_2 、CO 主要来源于人类，VOC（挥发性有机化合物）主要来源于生物。
- 光化学反应：
 - 光化学第一定律——光化活性原理：只有当光子的能量大于化学键能时才能引起光解反应，且分子对某特定波长的光要有特征吸收光谱，才能产生光化学反应。光解频率 $J = \int_{\lambda} F \sigma \varphi d\lambda$ ，其中 $F(\lambda)$ 是光化学通量， $\sigma(\lambda)$ 是吸收截面， $\varphi(\lambda)$ 是量子产率， $\varphi \leq 1$ 。
 - 光化学第二定律——光化当量定律：在初级光化学反应过程中，被活化的分子数（或原子数）等于吸收光的量子数，分子对光的吸收是单光子过程。
 - 大气化学中 $\text{NO} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{NO}_2$ 难以发生，只考虑 $\text{NO} + \text{O}_3 \longrightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ 。
 - 平流层重要的反应： $\text{O}_2 \xrightarrow{h\nu(\lambda < 240 \text{ nm})} \text{O} + \text{O}$ (O_3 的来源)。
 - 对流层重要的反应： $\text{O}_3 \xrightarrow{h\nu(\lambda < 340 \text{ nm})} \text{O}_2 + \text{O}(^1\text{D})$ (OH 的来源)， $\text{NO}_2 \xrightarrow{h\nu(\lambda < 420 \text{ nm})} \text{NO} + \text{O}(^3\text{P})$ (O_3 的来源)。
- 热化学反应：
 - NO_x 化学反应（光化学烟雾）：在工业化国家较为活跃。 $\text{HO}_x - \text{NO}_x$ 循环是对流层中产生 O_3 的主要原因。
 - HCs 化学反应：广泛存在。
 - O_3 和 NO_x 的光稳态： $\text{O}_3 + \text{NO} \longrightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ ， $\text{NO}_2 \xrightarrow{h\nu} \text{NO} + \text{O}$ ， $\text{O} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{M}} \text{O}_3 + \text{M}$ 。
 - 已知的对流层化学反应：大气层（尤其是对流层）充当了低温、慢速燃烧的发动机，将还原性化合物氧化。 $\text{CO}, \text{CH}_4, \text{HCs} \xrightarrow[\text{NO}, \text{NO}_2]{\text{OH}, \text{HO}_2} \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{其他副产物, 如 } \text{O}_3 \text{ 等。}$



作业

- 1. 请估计北京市上空水蒸气的质量。
- 2. 对流层大气主要的氧化剂是？
- 3. 对流层大气反应包括哪些类型？

第 3 讲 流动的大气

“

陈琦 2018 年 3 月 28 日

”

• 水平传输:

- 科里奥利力: 非惯性系中的假想力, 北半球向右偏, 南半球向左偏。偏离的距离 $\Delta y = \frac{\omega(\Delta x)^2 \sin \lambda}{v}$, 对大范围移动影响较明显。
- 地转流: 气压梯度水平分力和科里奥利力达到平衡, 同时考虑地表摩擦力作用。
- 大气环流: 三圈环流。ITCZ (热带辐合带): 南北半球气流交汇处。
- 水平传输的时间尺度: 东西方向较快, 南北方向较慢, 南北半球气流基本不交换。

• 垂直传输:

- 垂直温度梯度和大气稳定度: 浮力考虑垂直温度梯度、绝热递减率。
- 绝热递减率: 干绝热递减率 $\Gamma = -\frac{dT_a}{dz} = 9.8 \text{ K/km}$ 。当 $-\frac{dT_{atm}}{dz} > \Gamma$ 时大气不稳定, 产生对流, 相等时为中性, 小于时为稳定状态。若 $\frac{dT_{atm}}{dz} > 0$ 则为逆温状态。实际大气递减率约 6.5 K/km 。
- 逆温: 存在辐射逆温 (夜间因地面的强烈辐射而失去热量, 使紧贴其上的气层比上层空气有较大的降温, 而形成温度随高度递增的现象)、下沉逆温 (因整层空气下沉而导致的逆温)、地形逆温、锋面逆温等。
- 湍流: 大气垂直传输以湍流为主。菲克定律: $\Delta t = \frac{(\Delta z)^2}{2K_z}$ 。稳定大气中 $K_z = 1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$, 中性大气 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$, 不稳定大气 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。分子扩散: $0.2 \text{ cm}^2/\text{s}$, 对于地表大气混合传输来说不重要, 但对于高空 (100 km 以上) 重要。
- 垂直传输的时间尺度: 地表到对流层顶约 3 个月。

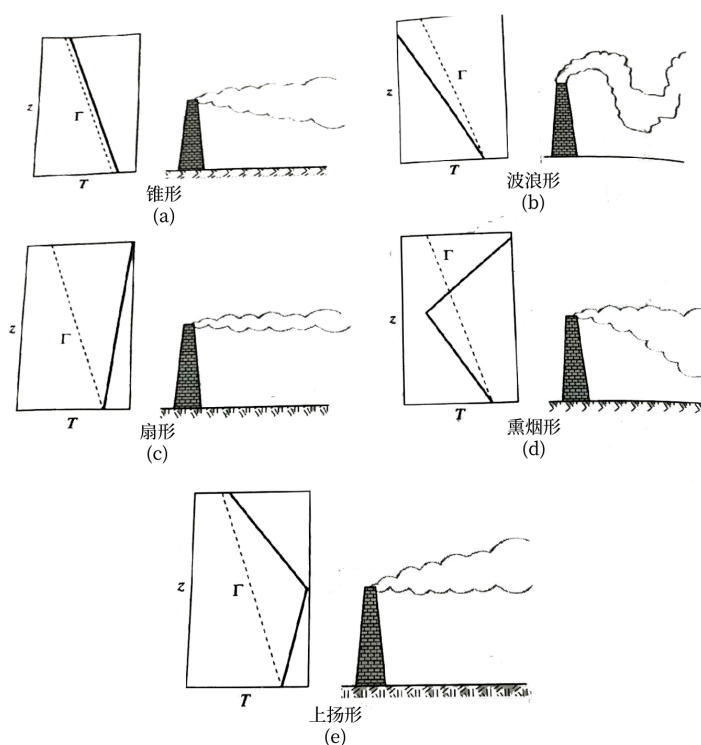


图 2 根据烟羽形状判断温度层结

烟羽形状判断（虚线为干绝热递减率）：当 $-\frac{dT_{atm}}{dz} > \Gamma$ 时不稳定，烟羽形状不规则；当 $-\frac{dT_{atm}}{dz} = \Gamma$ 时为临近状态，锥形；当 $-\frac{dT_{atm}}{dz} < \Gamma$ 时稳定，烟羽无法扩散。

第 4 讲 界面电子转移与地表环境

“

刘娟 2018 年 4 月 11 日

”

4.1 研究背景

- 地表环境的四个相互作用圈层：大气圈，岩石圈，生物圈，水圈。地表关键带：地表岩石，土壤，生物，水，大气相互作用带。传统的风化壳是其主要部分。
- 核废料填埋堆的场地污染问题：沉积物中放射性元素在含铁矿物表面富集。钛磁铁矿在该地区沉积岩中广泛存在。钛磁铁矿还原放射性核素 Tc(VII)，增加 Ti 掺杂量能有效地提高磁铁矿结构中的 Fe(II) / Fe(III)，从而提高对 Tc(VII) 的还原活性。
- 多尺度研究环境中污染物迁移、转化和富集，研究环境过程的微观机制。

4.2 电子转移的理论和研究方法

- 电子转移：有元素化合价变化的化学反应，其实质是电子的转移使化合价改变，即氧化还原反应。
 - 氧化还原电位：氧化还原反应中，反应物得失电子的能力。可用循环伏安法测量氧化还原电位。
 - 环境中不同变价元素的氧化还原电势差决定了电子的流向。铁元素是环境中重要的具有氧化还原活性的元素。
 - 电极表面电势：电子从金属表面逃逸产生。平衡电极电势：金属电极 M 与其盐溶液接触面之间的电势差。不同电极表面电势的差异性造成了电池电动势。 $E = E^\ominus - \frac{RT}{nF} \ln Q$ 。
- 吸附：一种物质从一相转移到另一相的现象（两相体系中，某个相地物质密度或溶质浓度在界面上发生改变的现象，即富集于界面层）。分类：
 - 物理吸附：范德华力（永久性偶极矩，诱导性偶极矩，四极吸引）。
 - 化学吸附：吸附质分子和吸附中心之间化学键的形成。
 - 交换吸附：吸附质离子由于静电引力聚集在吸附剂表面带电点上。
- 微生物的呼吸作用：微生物体内的有机物在细胞内经过一系列的氧化分解，最终生成二氧化碳、水或其他产物，并且释放出能量的总过程，叫做呼吸作用。类型：有氧呼吸、无氧呼吸。
 - 微生物胞外电子传递：电缆细菌一类的杆状细菌，它们可以首尾相接形成长达几个厘米的导电性线状结构，从而完成长距离的电子传递，在沉积物中 N、S、P 等元素循环和有机物转化方面发挥着重要作用。
 - 微生物胞外呼吸作用：利用多个细胞色素蛋白组成的跨膜电子传递链与胞外矿物进行电子传递。
 - 矿物在微生物胞外呼吸中的作用：胞外呼吸的终端电子受体；胞外呼吸的电子供体或能量来源；微生物体之间的电子传导物质；电子存储介质（蓄电池）。
 - 光合电子转移： $H_2O \longrightarrow NADP^+$ 合成 NADPH 和 ATP，暗反应阶段利用生成物同化 C 使 CO_2 还原为糖。

4.3 界面电子转移与污染物转化

- 变价金属元素参与的氧化还原反应对重金属形态有影响，地表铁元素在有氧环境下氧化为 Fe^{2+} ，在地表继续氧化为 Fe^{3+} 。 Fe^{3+} 在地下厌氧环境中进行还原，重新回到 Fe^{2+} ，进行循环。
 - 钛磁铁矿 $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ，增加 Ti 掺杂量能有效地提高磁铁矿结构中 Fe(II) 的含量，从而提高还原 Tc(VII) 活性。还原产物不易溶解，沉积在铁矿表面。表面吸附的 Tc(VII) 被晶格中的 Fe(II) 还原，并促使电子从颗粒内部向表面迁移，纳米尺寸的颗粒更有利于电子的固相迁移。
 - 纳米零价铁在环境修复中的应用：具有强还原活性， $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ 。作为一种高效还原性修复材料，被广泛应用于污染土壤及地下水修复技术中。不稳定，空气中表面氧化。

4.4 界面电子转移与微生物代谢过程

- 微生物介导的铁元素地球化学循环：铁还原菌胞外合成磁铁矿；微生物成矿固定放射性核素；微生物氧化二价铁形成含三价铁的纳米矿物成为吸附重金属砷的吸附剂
- 微生物胞外呼吸作用——分子水平：微生物利用多个细胞色素蛋白组成的跨膜电子传递链与胞外矿物进行电子传递。
- 矿物/岩石与微生物共同演化促进了元素循环。
- 宏观的环境过程是由微观反应决定的，厘清宏观环境现象的微观机制有助于从根本上认识和治理环境问题，各个圈层之间的相互作用塑造了地表环境，界面电子转移是物质/能量在各个圈层循环的重要途径。

作业

1. 根据酸性矿山废水的形成机制图，写出形成中涉及的过程以及相关方程。
2. 白色的生物膜中有硫化锌的纳米矿物颗粒形成的小球，提出可能的形成机制以及相关方程。

第 5 讲 面向未来的中国污水处理概念厂：核心技术与挑战

“

刘思彤 2018 年 4 月 25 日

”

5.1 水污染控制过程中的问题与挑战

- 工农业生产和人类生活产生大量废水：
 - 工业：化工、印染、制药、炼焦企业排放大量的有毒有害污染物；
 - 农业：现代农业大量使用农药、化肥；
 - 生活：滥用抗生素、激素等。
- 水生态与健康危害：污染在圈层中的迁移转化。
- 水中的物质是否都要去除或转化，涉及到水的用途和标准问题。
- 污水处理流程：格栅过滤→凝结（加入凝结剂）→微生物厌氧处理→微生物需氧处理→高级处理。微生物为功能性细菌。
- 废水中主要污染物：砂、砾尘，耗氧性有机物，氮、磷营养物，重金属，高毒性有机污染物等。
- 污水经处理后产生污泥、气体等副产物。微生物存在生化酶，催化化学反应的发生。
- 未来水环境领域发展方向：水质与生态安全，低碳低能耗，资源与能源回收，智能化与环境友好性，突破传统的技术等。
- 未来污水处理厂的总体发展趋势：实现水质目标，能量自给和资源回收。

5.2 中国污水处理概念厂技术理念与发展方向

- 中国污水处理概念厂：用 5 年左右时间，建设一座（批）面向 2030~2040 年、具备一定规模的城市污水处理厂。
- 中国污水处理概念厂核心理念：出水水质满足日益严格排放标准；零能耗；减少对外部化学品的依赖与消耗；感官舒适、建筑和谐、环境互通、社区友好。
- 技术挑战与主攻方向：
 - 生长速率慢：提高细胞产率；
 - 代谢条件严格：强化菌群团聚，反应器形式，工艺耦合模式参数调控，微环境创造与维系。
- 废水价值：有机物、氮、磷等，含有的能量约是处理废水能量的 10 倍。
- 污水处理的关键问题：
 - 氮磷污染处理水平不能达标，P 与 N 难以结合；
 - 土地稀缺，成本高昂；
 - 低温条件下污染物去除效率低；
 - 底泥排放脱水和利用困难。
- 传统流程中的主要冲突：用于去除 N 和 P 的常规生物过程的基础：好氧硝化和厌氧反硝化；好氧磷吸收和厌氧磷释放。这些限制了同时硝化 – 反硝化作用和磷摄取释放。
- 具有特殊功能的新型细菌：在单一需氧或缺氧条件下能够进行异养硝化 – 好氧反硝化和单一菌株的磷去除，能够同时去除 C、N 和 P。该菌株降低了建设成本，充分利用优势。可与原始污泥完全相容并有效改善污泥结构。
- 城市污水处理的发展阶段：去除悬浮颗粒 → 去除 BOD → 去除 N 和 P → 去除重金属。
- 现阶段废水处理的限制因素：废水中资源和能量浪费；高能耗和温室气体排放。

5.3 氮污染物微生物转化相关机制

- 传统硝化反硝化：
 - 硝化：化学反应： $2\text{NH}_4^+ + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{NO}_2^- + 4\text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$, $2\text{NO}_2^- + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{NO}_3^-$ ；生化反应： $\text{NH}_4^+ + 1.83\text{O}_2 + 1.98\text{HCO}_3^- \longrightarrow 0.021\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2 + 0.98\text{NO}_3^- + 1.041\text{H}_2\text{O} + 1.88\text{H}_2\text{CO}_3$ 。
 - 反硝化：化学反： $6\text{NO}_3^- + 2\text{CH}_3\text{OH} \longrightarrow 6\text{NO}_2^- + 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$, $6\text{NO}_2^- + 3\text{CH}_3\text{OH} \longrightarrow 3\text{N}_2 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + 6\text{OH}^-$ ；生化反应： $\text{NO}_3^- + 1.08\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}^+ \longrightarrow 0.065\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2 + 0.47\text{N}_2 + 0.76\text{CO}_2 + 2.44\text{H}_2\text{O}$ 。
- 短程硝化反硝化：将硝化反应控制在亚硝酸盐阶段，不进行亚硝酸盐至硝酸盐的转化，直接进行反硝化反应。
 - 硝化： $2\text{NH}_4^+ + 1.5\text{O}_2 \longrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2$ 。
 - 反硝化： $6\text{NO}_2^- + 3\text{CH}_3\text{OH} \longrightarrow 3\text{N}_2 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + 6\text{OH}^-$ 。
- ANAMMOX：部分氨氮转化为亚硝酸氮，随后在细菌催化下氨氮与亚硝酸氮生成氮气，不需要消耗有机物。
 - 硝化： $2\text{NH}_4^+ + 1.5\text{O}_2 \longrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2$ 。
 - 反硝化：化学反： $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \longrightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ；生化反： $\text{NH}_4^+ + 1.32\text{NO}_2^- + 0.066\text{HCO}_3^- + 0.12\text{H}^+ \longrightarrow 1.0\text{N}_2 + 0.26\text{NO}_3^- + 0.066\text{CH}_2\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.15} + 2.03\text{H}_2\text{O}$ 。
 - COD 消耗为 0，节约 $\frac{2}{3}$ 的氧气消耗。剩余的 COD 可以全部用于甲烷生产，污水处理厂从耗能除污末端

转化为零能耗或能量输出。

- 传统生物脱氮技术： $\text{NH}_4^+ \xrightarrow{\text{半硝化}} \text{NO}_2^- \xrightarrow{\text{硝化}} \text{NO}_3^- \xrightarrow{\text{反硝化}} \text{N}_2$ 。新型生物脱氮技术： $\text{NH}_4^+ \xrightarrow{\text{半硝化}} \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \xrightarrow{\text{ANAMMOX}} \text{N}_2$ 。

作业

- 请列举 3-5 项兼顾能源回收的高效污水处理技术，并分析目前制约废水再生和回用的瓶颈问题。

第 6 讲 从环境到人体：污染物暴露与健康效应

“

邱兴华 2018 年 5 月 9 日

”

6.1 环境健康学科简介

- 环境科学的终极目标：保护公众健康和社会福利不受环境因素（主要是污染物）的危害。实现方法：对环境污染物加以控制。
- “以环境科学为基础的污染物控制”与“保护人体健康的终极目标”之间存在偏差。
- “环境健康”是在环境科学基础上发展起来的一门前沿交叉学科，环境健康关注人体与环境的相互作用。

6.2 人体与环境的关系

- 人体与环境的辩证关系：对立统一的关系。人体与环境的关系是环境健康研究的前提，污染物暴露是不可避免的。
 - 统一：从环境获得物质与能量——呼吸道，消化道；
 - 对立：人体相对独立于环境——皮肤，排泄系统。
- 人体的环境适应性：人体对环境变化有一定调节功能以适应环境状态的变动。
 - 有限度的环境适应性：环境条件发生剧烈变化超过人体正常的调节范围时，可引起人体功能异常，最终导致疾病甚至死亡。某些物质在低剂量时对人体系统具有刺激作用，而在高剂量时具有抑制作用。

6.3 污染物健康影响评价的基础：暴露与剂量

- 环境健康学科体系与研究内容：环境健康学科以人体为研究对象，研究真实普遍的环境下环境因素（尤其是污染物）的健康效应，识别危害人体健康的关键环境因素尤其是污染物，建立污染物与健康效应的定量关联。
- “环境暴露学”是环境科学向人体健康的延伸，是环境健康研究的基础，主要任务是评价危害人体健康的因素（尤其是污染物）的暴露水平。
- “暴露”及“剂量”是环境暴露学的核心概念。
 - 暴露：研究对象（即人体）与环境污染物的接触，以及接触的污染物浓度。
 - 剂量：发生暴露之后进入人体的污染物浓度（又称作内暴露浓度）。
- 污染物浓度和与点源的距离成负相关。当距离较远时，污染物浓度急剧下降。对居民区来说，距离较远的火电厂影响较小，吸烟影响较大。
- 苯的排放源主要为机动车和工业，而暴露源主要为吸烟、驾驶和室内等。
- 暴露、剂量的评价方法：

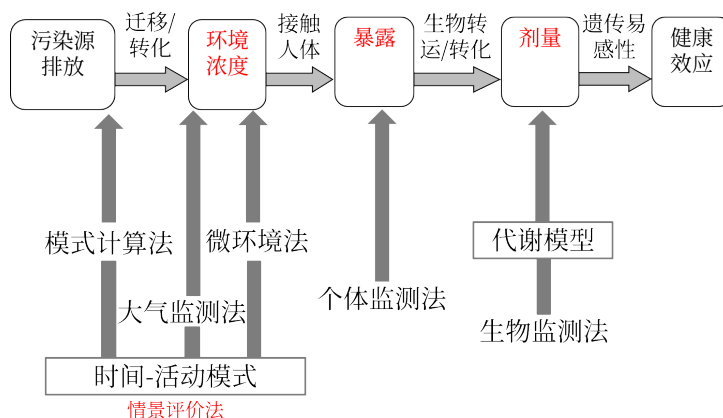


图3 暴露、剂量的评价方法

6.4 污染物控制的依据：剂效关系

- 环境健康学科的核心任务：
 - 应该优先控制哪些污染物（或排放源）？——健康危害因素识别
 - 把这些污染物控制到什么程度（从而其人体健康风险处于可接受水平）？——污染物的健康效应评价
- 健康效应评价指标：暴露于污染物后，可用于评价污染物所导致健康危害程度或范围的指标。
 - 效应（生物学效应）：人体暴露于环境污染物后引起的生物学改变——效应生物标志物等。
 - 反应：暴露于环境污染物后，指征某种生物学效应并达到一定强度的个体在人群中所占的比例，如发病率、死亡率等。
- 污染物控制应有的基础认识：环境污染的彻底控制技术上不可能、经济上不经济、生物学不必要。
- 污染物控制的理论依据：污染物暴露与健康效应的定量联系（即剂效关系；并且具有因果关联）。

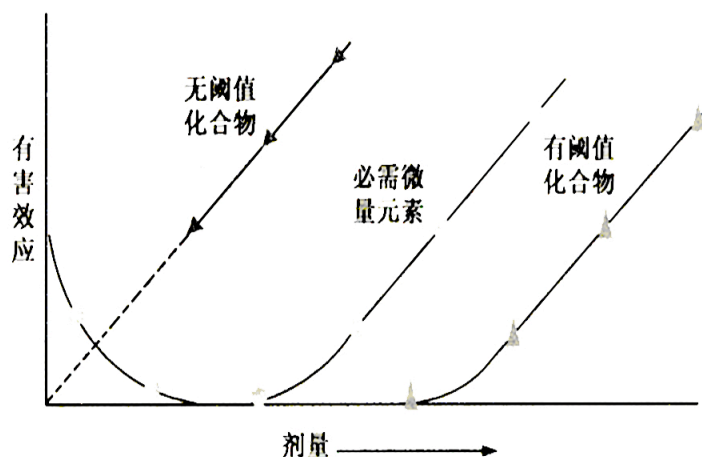


图4 典型的剂效关系曲线

- 大气颗粒物控制的两个关键问题：阈值；高浓度端的趋势。 $PM_{2.5}$ 的暴露-反应关系是非线性关系，高浓度时存在很大的不确定性。
- 识别危害人体健康的环境因素：慢性疾病的病因：外因（环境因素）：环境污染物，营养状况，生活习惯，生存压力；内因（遗传因素）：遗传组学。
- 暴露评价的发展趋势：暴露组学。暴露组学与多种组学（基因组学、蛋白质组学、代谢组学）的结合，有助于揭示环境因素影响人体健康的机制，是环境与健康领域的未来发展趋势。
 - 暴露组：从胎儿期开始整个生命过程中的所有环境暴露的总和。

- 环境健康的学科内涵:
 - 环境健康学科是当前形势下环境科学深化发展的重要方向之一，是环境科学向人体健康的延伸。
 - 环境健康是一门前沿交叉学科，以暴露和健康效应评价为基础，研究实际环境因素的人体健康影响。
 - 环境健康学科的本质是探讨人体与环境间的相互关系，从而最终实现人类与环境的和谐共处、以及人类的可持续发展。
- 点源污染物暴露计算：点源污染物的扩散遵从高斯方程： $\lg c = -\alpha \lg d + K$ ；其中 c 为下风向距污染源 d 处的污染物浓度， α 和 K 均为常数。
- 室内暴露计算：室内污染物浓度可由下式表示： $c(t) = \frac{g_{\text{source}}}{\varphi V} (1 - e^{-\varphi t})$ ，该式假设 $t = 0$ 时污染物开始排放， $c(t)$ 为 t 时刻的浓度， g_{source} 为恒定的源强， V 为室内体积， φ 为换气频率。

作业

1. 假设某工厂下风向 1 公里处的细颗粒物浓度为 $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，请计算下风向 20 公里处的室外人员因该工厂排放而导致的颗粒物暴露浓度。（ α 取值 1.5）
2. 假设某房间面积 20 m^2 ，高 3 m，换气频率为每小时 0.5 次，因抽烟而导致的颗粒物排放速率按 $800 \mu\text{g}/\text{min}$ 计，请问：
 - (1) 一小时之后，室内人员的颗粒物暴露浓度为多少？假设抽烟排放一直持续，最高暴露浓度是多少？
 - (2) 请指出哪些因素能够影响了室内污染物暴露。

第 7 讲 从环境到人体：污染物人体健康效应的体现

“

官继成 2018 年 5 月 23 日

”

7.1 研究背景

- 环境健康研究回答的问题：
 - 如何准确识别导致健康问题的环境因素；
 - 如何定量评价环境问题的健康风险；
 - 如何定量评价环境问题健康风险的经济代价；
 - 如何定量评价环境问题健康风险的社会代价；
 - 如何制定环境问题健康风险的控制措施。

7.2 污染 - 效应研究方法：

研究方法			
观察法	描述流行病学	横断面调查 (资料收集于某一时点或在一个较短时间区间内，反映该时间点的疾病分布以及人们的某些特征与疾病之间的关联)	产生假设
		生态学研究 (在群体的水平上研究某种因素与疾病之间的关系，通过描述不同人群中某因素的暴露状况与疾病的频率，分析该暴露因素与疾病之间的关系)	
	分析流	病例对照研究	检验

续表

	流行病学	(回顾性研究, 比较患某病者与未患某病的对照者暴露于某可能危险因素的百分比差异, 适用于发病率极低的疾病)	假设
		队列研究 (前瞻性研究, 将特定人群按是否暴露于某可疑因素或暴露程度分为不同的亚组, 追踪观察疾病发生的情况, 因果论证能力较强)	
	实验流行病学	临床试验 现场试验 社区干预项目	验证假设
数理法	理论流行病学		

统计关联到因果关联			
关联	偶然关联		
	有统计学意义的关联	非因果关联 (选择、测量或混杂偏倚)	
		因果关联 (有时间先后)	间接因果关联 (间接病因) 直接因果关联 (直接病因)

- 流行病学: 研究特定人群中与健康有关的状态或事件的分布及决定分布的影响因素, 并应用于解决健康问题的一门科学。
- 经典流行病学研究: 1747 年英国詹姆斯·林德证实新鲜水果柠檬和柑橘等可预防坏血病。
- 尽快寻找到降低污染物暴露的健康风险的有效措施:
 - 寻找大气污染物的源排放, 形成机制;
 - 大气污染物的人体暴露水平评价;
 - 大气污染物暴露的健康效应评价;
 - 大气污染物暴露的健康风险评估;
 - 制定大气污染物暴露的控制措施。
- 城市大气污染物的形成: 大气二次污染物经一次污染物通过复杂的非线性化学过程生成, 是灰霾、光化学烟雾、酸雨的主要组分, 其环境影响和控制原理与一次污染有很大的差异。
 - 一次污染物: SO₂, NO_x, VOCs, PM_{2.5} 等。
 - 二次污染物: O₃ 等强氧化剂, SNA (二次无机颗粒物) SO₄²⁻、NO₃⁻, NH₄⁺, SOA (二次有机气溶胶) 。
 - 大气细颗粒物成份复杂: 包含非生物和生物组分。非生物: 硫酸盐、硝酸盐、铵盐、金属、矿物质、有机物、黑碳; 生物: 病毒、细菌、真菌、花粉。
 - 细颗粒来源与化学组份复杂, 粒径越小的颗粒物, 越能够沉积到呼吸道的深处, 甚至进入血液循环系统,

细颗粒暴露导致呼吸和心血管系统的发病率和死亡率增加。

- 细颗粒可诱发氧化性损伤，影响呼吸系统、心血管系统、免疫系统、生育系统、神经系统、遗传系统，但机制非常复杂，很多影响和机制尚不清楚。
- 健康效应评价：
 - 慢性效应评价：慢性疾病的发病率、死亡率，潜在减寿年数，伤残调整寿命年。
 - 急性效应评价：急性疾病的发病率、死亡率，医院门诊、急诊的就诊率，急性效应临床指标、生物标志物等。
- 健康效应评价指标：人群水平：发病率，死亡率。个体水平：生物标志物。
- 生物标志物：外源性物质进入组织或体液后，对外源化学物质或其生物学过程的客观测量和评价指标，也是生物体受损时的重要毒作用指标。
- 生物标志物的特点：
 - 特异性：对特定的环境暴露具有标示作用。
 - 敏感性：存在剂量－效应关系。
 - 持续时间与稳定性：利于样品的保存，运输和分析。
 - 预警性：暴露早期诱导产生，短期效应，对外界暴露的潜在健康影响提供预警信号。
 - 广泛性：能在多种生物体间应用。
- 生物标志物的应用：
 - 暴露生物标志物。内剂量标志：外源性物质进入人体的直接证据，被人体吸收的量，比外环境暴露剂量更可靠。生物效应剂量标志：比内剂量标志有更精确的生物学意义。
 - 效应生物标志物：反映外源性物质及其代谢产物早期的生化、生理、或其他病理方面改变的效应指标，与生物效应剂量标志不同之处在于反映疾病病理过程中的一个阶段，持续作用等。
 - 易感性生物标志物：反映机体先天具有或后天获得的对暴露外源性物质反应能力的指标，不包含在暴露－效应关系链，但是决定疾病发生的重要因素。

7.3 研究例证

- 暴露干预实验研究：增加暴露类：暴露仓、面罩暴露；减少暴露类：口罩、空气净化器。

作业

1. 阅读文献，简要评论巧克力的消费量与诺贝尔奖获奖人数的关联。
2. 根据下表中的数据，计算该地区在 2015 年癌症在各年龄组及总人口中的发病率和死亡率。

第 8 讲 经济发展与能源消费视角下的环境问题及治理

“

戴翰程 2018 年 6 月 6 日

”

8.1 研究背景

- 背景：国内外形势共同倒逼绿色低碳转型。
 - 国内：产能过剩、资源环境制约、产业结构调整。
 - 国际：国家减排承诺、全球碳交易、绿色贸易壁垒。
 - 需要实现经济增长、产业转型、外贸优化与低污染、低碳排放、可持续双赢。

- 政策的综合评价:
 - 经济: 人口、资本 / 资源、技术水平、GDP、产业界后、居民收入、贸易。
 - 能源: 能源消费、技术选择、服务量需求。
 - 环境: 一次排放、环境质量、人群健康。
- 能源经济学: 利用经济学的理论及方法, 研究能源在开发、利用过程中的各种经济现象及其演变规律的一门经济学学科。
 - 研究对象: 将能源资源作为一种重要的生产要素和稀缺商品, 探索人类如何而对有限的能源资源和环境约束做出权衡取舍的经济行为, 并对相关社会影响及解决方案展开政策分析。
 - 内容: 能源供给与需求; 能源效率与节能; 能源市场与碳市场; 气候变化与环境变化; 能源安全与预警; 能源建模与系统开发; 能源公平与能源贫困。
- 研究方法: 分为实证研究和实验研究两种。
 - 实证研究: 依据基本经济学原理或实践经验, 通过收集数据, 开展计量或统计分析。
 - 实验研究: 先依据有关经济学理论建立行为方程和平衡方程 (方程参数大多依据经验或校准获得), 然后改变外生变量 (如税收政策、能源价格等), 对模型系统进行运算模拟得到结果。

8.2 能源的基础知识

- 资源: 人类可以直接从自然界, 并用于生产与生活的物质和能量。
- 能源: 能量的来源或源泉。从自然界直接取得的具有能量的物质或从这些物质中再加工制造出来的新物质, 是人类赖以生存的物质, 是发展生产、改善人民生活的物质基础。
- 能源的分类:
 - 按能源的形成和再生性: 不可再生能源和可再生能源。
 - 按技术开发程度: 常规能源和新能源。
 - 按对环境的污染程度: 清洁能源和非清洁能源。
 - 按能源的成因: 一次能源和二次能源。
- 能源计量的当量单位: 标准煤、标准油、标准气。

8.3 能源与经济

- 能源是社会生产力的核心和动力源泉, 是人类可持续发展的物质基础。能源消费增长与经济增长存在因果关系。经济产业结构变化与能源消费之间有密切关系。能源价格上涨对宏观经济有紧缩作用。
- 能源需求: 在各种可能的价格下, 对能源资源愿意并且能够购买的数量。能源需求是一种派生需求, 是由对社会产品和服务的需求而派生出来的。
- 能源需求总量: 各种能源需求量之和, 通常指一次能源需求量。包括: 终端能源需求量、能源加工转换损失量、能源损失量。
- 能源需求结构: 能源需求总量中各种能源品种所占的比例。
- 能源需求的影响因素: 经济增长, 社会发展, 产业结构, 能源价格, 能源技术与管理, 其他。
- 能源供给: 在一定时期内, 能源生产部门在各种可能的价格下, 愿意并能够提供的数量。特点: 有限性, 区域性。
- 能源供给总量: 一定范围内各种能源供给量之和。
- 能源供给结构: 能源供给总量中各类能源所占比例。提高优质能源所占比重; 提高能源品种多元化程度。
- 能源供给影响因素: 资源禀赋, 即资源的储量; 能源价格, 但短期内调整产量的能力有限; 能源投资, 周期

较长。

- 能源强度：某一经济行为体单位产值消耗的能源量，单位为吨油（或煤）当量 / 美元（或其他货币单位）。反应经济对能源依赖程度的一个重要指标；反应经济行为体利用能源效率的状况；反应了由技术水平、发展阶段、经济结构、能源需求结构等多方因素形成的能源需求水平和经济产出的比例关系。
- 如何从经济联系到环境？
 - 生产力（人口，资本，技术）→经济结构（GDP，产业结构，贸易）；
 - 产业结构→能源消费；
 - 能源消费→一次排放（污染物）；
 - 一次排放→环境质量；
 - 环境质量→人群健康；
 - 人群健康=人口→生产力。

8.4 能源与环境

- 排放清单：污染物排放总量。包含了某地区某年内各污染源排放的温室气体、大气污染物总量。KAYA 公

$$\text{式：排放} = \text{人口} \times \frac{\text{GDP}}{\text{人口}} \times \frac{\text{能源}}{\text{GDP}} \times \frac{\text{排放}}{\text{能源}}。$$

8.5 能源环境政策的费效分析

- 政策的综合评价：结合不同学科知识，系统地量化污染物排放的社会经济驱动力，污染物在环境中的迁移转化及其对全球和地区气候环境的影响，以及气候环境变化对生态系统和人类福祉的影响。
- 综合评价模型：用于综合评价的定量分析工具。
- 分类：自上而下（一般均衡，局部均衡）；自下而上（技术优化模型，系统分析模型）；混合。

作业

- 假设我国每年投入市场 2000 万辆私家车，每辆车年均行驶里程 15 000 km，其中一半是电动车，另一半是燃油车，问：
 - 需要新增多少燃油和电力消费？消费者购买燃油和电力支出各是多少？
 - 如果新增电力全部为燃煤发电，需要烧多少煤？
 - 燃油和电动车每年各产生多少二氧化碳排放？
 - 考虑环保和经济性，你会怎么选择？

2017 年 6 月考试题

“ 整理：做好事不留名的 Thomas ”

一、名词解释

1. 对流层
2. 气溶胶
3. 逆温（给出至少两种逆温类型）
4. 吸附作用（给出分类）
5. 短程硝化

6. 污染物暴露
7. 生物标志物 (给出分类)
8. 一次能源、二次能源 (给出几个例子)

二、简答题

1.
 - 光化学烟雾污染的主要驱动力，光化学烟雾污染和重霾污染的主要标志性污染物。
 - 雾和霾的区别，并简要描述相对湿度（过饱和度）的增加，雾和霾的形成过程。
2. 用迭代法计算粒径为 $100\ \mu\text{m}$ 的颗粒物的真实沉降速度（设雷诺数为 4）。
3. 写出短程硝化、硝化、反硝法和厌氧氨氧化四个氮转化的生化反应方程式，并分析和传统生物脱氮工业相比，新型生物脱氮工艺的节能降耗优势。
4. 以 $\text{PM}_{2.5}$ 为例，着重阐述如何对污染物的暴露水平和健康效应进行研究，以及研究污染物剂效关系的重要性。
5. 什么是政策的综合评价？请简述为什么要从经济和能源的角度对大气污染环境治理政策进行综合评价。

